



[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft eine Anordnung zur Abbildung des von mindestens einem von mehreren Punkten einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einem Detektor.

[0002] Bekannt sind sogenannte Teilchenlinsen, d. h. Linsen, bei denen geladene Teilchen, z. B. Elektronen ähnlich beeinflusst werden, wie Lichtstrahlen, die eine optische Linse passieren.

[0003] Derartige Teilchenlinsen finden Einsatz z. B. in Elektronenmikroskopen. Hierbei sind die chromatische und sphärische Aberration von Teilchen- oder Elektronenlinsen die wesentlichen auflösungsbegrenzenden Faktoren. Während der Astigmatismus auf einer Fehljustierung beruht und durch elektrische oder magnetische Stigmatoren relativ leicht kompensiert werden kann, und die Koma- und Bildfeldwölbung meist von nachrangiger Bedeutung sind, sind der chromatische und der sphärische Fehler für alle Optiken aus Rundlinsen ein zentrales Problem. Bei der sogenannten sphärischen Aberration werden bei Teilchenstrahlen großer Öffnung achsenparallele oder von einem Objektpunkt auf der Achse ausgehende achsensymmetrische Strahlen nicht in einem gemeinsamen Bildpunkt vereinigt. Bei Sammellinsen schneiden sich die achsenparallel einfallenden Strahlen im Bildraum vor dem durch die paraxialen Strahlen gelieferten idealen Bildpunkt.

[0004] Die chromatische Aberration wird durch die unterschiedliche Energie der Teilchen im Teilchenstrahl verursacht, wobei sich die Teilchen unterschiedlicher Energie nicht in einem idealen Bildpunkt treffen. Oder anders ausgedrückt: Bei der sphärischen Aberration haben Teilchen gleicher Energie eine unterschiedliche Flugbahn und treffen daher an unterschiedlichen Stellen die Bildachse. Bei der chromatischen Aberration besitzen die Teilchen eine unterschiedliche Energie und kreuzen aus diesem Grund an unterschiedlichen Stellen die Bildachse.

[0005] Im Gegensatz zur Lichtoptik lassen sich diese Aberrationen nicht mittels geeigneter Linsenkombination korrigieren. Der Grund dafür ist, dass, unabhängig von Typ und Geometrie der gewählten Linse, für alle elektronenoptischen Rundlinsen der sphärische Aberrationskoeffizient  $c_s$  und der chromatische Aberrationskoeffizient  $c_c$  immer positiv definit sind. Damit ist die Kombination von Linsen mit Koeffizienten mit wechselndem Vorzeichen in einem System aus Rundlinsen prinzipiell ausgeschlossen.

[0006] Diese fundamentale Eigenschaft aller elektronenoptischen Rundlinsen ist als Scherzer-Theorem bekannt [O. Scherzer, Z. für Physik 101, 593 (1936)]. Als Konsequenz müssen die Strahlengänge in Elektronenmikroskopen durch extrem kleine Aperturblenden begrenzt werden.

[0007] Schon Scherzer hat nach Auswegen aus diesem Dilemma gesucht und verschiedene Möglichkeiten zur Korrektur von  $c_s$  und  $c_c$  diskutiert [O. Scherzer, Optik 2, 115 (1947)]. Diese Thematik wurde später in einer Vielzahl von Arbeiten aufgegriffen, einen Überblick geben Hawkes und Kasper (Principles of Electron Optics, Academic Press 1996, Band 2, S. 857ff). Die Voraussetzungen für die Gültigkeit des Scherzer Theorems sind: Rundlinsen, reelles Bild, statische Felder, keine Raumladung, keine Potentialsprünge. Aus diesen Randbedingungen ergeben sich diverse prinzipielle Möglichkeiten, das Theorem zu umgehen. Trotz zahlreicher Versuche mit verschiedenen Methoden war bisher nur der Einsatz von Multipolkorrektoren in der höchstauflösenden Transmissions-Elektronenmikroskopie erfolgreich [M. Haider, S. Uhlemann, E. Schwan, H. Rose, B. Kabius, K. Urban, Nature 392, 768 (1998)]. Zur Zeit wird eine weitere Möglichkeit der Korrektur durch die Verwendung

von Elektronenspiegeln erprobt (G. F. Rempfer et al., Microsc. Microanal. 3, 14 (1997); R. Fink et al., Journal of El. Spectrosc. Relat. Phenom. 84, 231 (1997)). Diese Verfahren stellen extrem hohe Ansprüche an die mechanische Baugenaugigkeit und die Strom- bzw. Spannungsstabilität der Elektronik. Auch der Justieraufwand ist sehr groß, besonders im Fall des nichtlinearen Strahlenganges bei der Lösung mit Elektronenspiegel.

[0008] Von mehreren Autoren wurde die Anwendung von sogenannten Hochfrequenzlinsen diskutiert und z. T. erprobt (Hawkes und Kasper, wie oben, S. 872), bei denen die Linse durch einen Mikrowellen-Resonator gebildet wird oder ein solcher in eine Linse integriert wird. Es zeigte sich, dass die Phasenbedingung (Beziehung zwischen der Phase der Mikrowelle beim Eintreten des Elektronenpulses in den Resonator) und die Verweilzeit im Resonator eine dominierende Rolle spielen. Keiner der Vorschläge im Zusammenhang mit Hochfrequenzlinsen konnte bisher mit praktischem Erfolg realisiert werden.

[0009] Der Beitrag der chromatischen Aberration zur Gesamtauflösung einer abbildenden Optik ist gegeben durch

$$\delta_c = c_c \alpha \Delta E / E$$

wobei  $c_c$  der von der Linsengeometrie und der Energie abhängige chromatische Aberrationskoeffizient,  $\alpha$  der von der Kontrastblende akzeptierte Öffnungswinkel und  $\Delta E / E$  die relative Breite der Energieverteilung der zur Abbildung gelangenden Elektronen mit Schwerpunkt bei der Energie  $E$  ist. Der Beitrag der sphärischen Aberration ist

$$\delta_s = c_s \alpha^3$$

wobei  $c_s$  der Koeffizient der sphärischen Aberration ist.

[0010] Eine Anordnung zur Abbildung des von einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einen Detektor, bei der die chromatische und/oder die sphärische Aberration minimiert ist, umfasst nach einer ersten Variante ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei ein Teil der Optik (Driftstrecke) durch eine schnell schaltbare Spannung derart ansteuerbar ist, dass die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen des Teilchenensembles derart beeinflusst wird bzw. ansteuerbar ist, dass die von einem Punkt der Probe ausgehenden Teilchenbahnen in nahezu einem Punkt die Bildebene schneiden und so der chromatische Fehler der Abbildung reduziert wird. Bei dieser Überlegung wird davon ausgegangen, dass die schnellsten Elektronen bei Erreichen des Endes der Driftstrecke durch das schnell eingeschaltete elektrische Feld in der Rundlinsenoptik nicht mehr beeinflusst werden. Die langsameren Teilchen bzw. Elektronen werden hingegen beim Durchlaufen der Rundlinsenoptik durch das Anlegen einer geeigneten Spannung beschleunigt, wobei der Energiegewinn proportional zu der noch zu durchlaufenden Länge des geschalteten Teils der Driftstrecke ist. Das heißt, dass der Energiegewinn umso höher ist, je langsamer das Elektron auf seinem Weg durch die Rundlinsenoptik ist. Die Energieverteilung des Teilchenensembles wird folglich invertiert. Das heißt, dass die Elektronen oder Teilchen am Beginn des Ensembles die unveränderte Energie aufweisen, jedoch die Teilchen bzw. Elektronen in der Mitte des Bündels eine neue Energie besitzen, die höher ist, als die Ursprungsenergie, und die Elektronen am Ende des Bündels eine noch höhere Energie aufweisen, als die ursprünglich schnellsten Teilchen des Teilchenensembles. Insofern ist die Energieverteilung – wie bereits erläutert – invertiert.

[0011] Wenn nunmehr die ursprünglich schnellsten Teilchen ihre Energie bzw. Geschwindigkeit beibehalten, die

Teilchen bzw. Elektronen mit der mittleren Geschwindigkeit nachbeschleunigt werden, auf eine Geschwindigkeit, die über der der ursprünglich schnellsten Teilchen liegt, und die langsamsten Teilchen bzw. Elektronen ebenfalls derart beschleunigt werden, dass diese noch weiter oberhalb der der ursprünglich schnellsten Teilchen bzw. Elektronen liegt, kann z. B. der chromatische Fehler der nachfolgenden Rundlinsenoptik die chromatischen Fehler der vorausgehenden Optik ausgleichen. Die Teilchen bzw. Elektronen werden in einem gemeinsamen Bildpunkt vereinigt, mithin ergibt sich eine chromatisch scharfe Abbildung, da sich die Teilchen bzw. Elektronen insgesamt im idealen Bildpunkt treffen. Hieraus wird erkennbar, dass die Spannung innerhalb eines Zeitraumes zu schalten ist, innerhalb dessen sich das Teilchenensemble im schaltbaren Bereich der Driftstrecke befindet.

[0012] Weitere vorteilhafte Merkmale sind den Unteransprüchen zu entnehmen.

[0013] Nach einer besonderen Ausführungsform zu dieser ersten Variante ist vorgesehen, dass die Teilchen innerhalb des Teilchenensembles durch eine Gegenspannung abgebremst werden, wobei in einer nachgeordneten, niederenergetischen Driftstrecke, sich der Abstand zwischen den einzelnen Teilchen zueinander erhöht. Durch die Abbremsung der Teilchen bzw. Elektronen durch die Anlegung einer Gegenspannung wird erreicht, dass die Teilchen bzw. Elektronen zwar noch unterschiedlich schnell sind, jedoch auf einem insgesamt niedrigeren Geschwindigkeitsniveau. Diese unterschiedlichen Geschwindigkeiten der einzelnen Teilchen oder Elektronen auf diesem niedrigen Geschwindigkeitsniveau bewirkt, dass in der niederenergetischen Driftstrecke sich die Elektronen bzw. Teilchen mit verschiedenen Energien weiter von einander entfernen. Nach der Driftstrecke werden die entsprechenden Teilchen bzw. Elektronen in ihrer Energie bzw. Geschwindigkeit derart angehoben, dass die langsameren Teilchen gegenüber den schnelleren Teilchen derart beschleunigt werden, dass die Teilchen insgesamt sich in einem gemeinsamen Bildpunkt vereinigen, und so eine scharfe Abbildung erzeugen, wie dies bereits oben beschrieben wurde.

[0014] Nach einer weiteren zweiten Variante ist eine Anordnung zur Abbildung des von mindestens einem von mehreren Punkten einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles vorgesehen, umfassend ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei die Rundlinsenoptik eine niederenergetische Driftstrecke aufweist, um den räumlichen und zeitlichen Abstand der Teilchen des Teilchenensembles mit verschiedenen Energien zueinander zu vergrößern, wobei bei Passieren der Rundlinsenoptik durch die Teilchen, die Brechkraft der Rundlinsenoptik hinter der Driftstrecke zu jedem Zeitpunkt so angepasst wird, dass die Brennweite für alle Teilchenenergien gleich ist. Im Einzelnen ist hierbei vorgesehen, dass die Rundlinsenoptik derart angesteuert wird, dass alle Teilchenenergien des Ensembles mit identischem Vergrößerungsmaßstab auf dem Bildschirm abgebildet werden.

[0015] Weitere vorteilhafte Merkmale zu dieser zweiten Variante sind den Unteransprüchen zu entnehmen.

[0016] Nach einer dritten Variante ist eine Anordnung zur Abbildung des von mindestens einem von mehreren Punkten einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einem Detektor vorgesehen, umfassend ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei ein Teil der Rundlinsenoptik durch mindestens eine schnell schaltbare Spannung der Art ansteuerbar ist, dass die Bahn der einzelnen Teilchen des Teilchenensembles so beeinflusst wird, dass die von einem Punkt ausgehenden Teilchen in nahezu einem Punkt die Bildebene durchstoßen und so der

sphärische Fehler der Abbildung reduziert wird, wobei zu diesem Zweck eine Linse der Optik sehr schnell geschaltet wird, während das Teilchenensemble sich im Linsenfeld befindet und die sphärische Aberration dieser Linse die der übrigen Teilchenoptik kompensiert.

[0017] Gegenüber der ersten Variante ist hierbei die Beeinflussung der Flugbahn der Teilchen mit dem Ziel maßgeblich, dass die Teilchen die Bildebene in einem Punkt durchstoßen. Die Beeinflussung der Flugbahn erfolgt durch das Anlegen der Spannung.

[0018] Allen Varianten ist gemein, dass die Rundlinsenoptik zumindest eine teilchenoptische Rundlinse umfasst.

[0019] Die Abbildung der Teilchen bzw. des Teilchenensembles erfolgt auf einem Detektor. Ein solcher Detektor kann einen Leuchtschirm umfassen, das Bild wird z. B. durch eine CCD-Kamera erfasst. Alternativ besteht die Möglichkeit den Detektor derart auszubilden, dass die Teilchen einzeln erfasst werden, und zwar insbesondere hinsichtlich des Ortes und der Zeit des Auftreffens der Teilchen auf dem Detektor. Dies bringt eine ganze Reihe von Vorteilen mit sich; so besteht insbesondere die Möglichkeit einer energieaufgelösten Abbildung der einzelnen Teilchen bzw. es besteht die Möglichkeit der Abbildung einzelner Teilchenenergien, wobei die einzelnen Abbildungen im Maßstab aneinander angeglichen werden können, so dass ein randscharfes Gesamtbild entsteht. Dabei sollen die zueinander maßstäblichen Abbildungen bei verschiedenen Energien aufeinander zur Deckung gebracht werden, was gegebenenfalls durch Stauchung, Streckung oder Drehung der Abbildungen oder Verschiebung mittels geeigneter Bilderfassungssoftware erfolgen kann. Damit können auch Einflüsse von Störfeldern kompensiert werden.

[0020] Besonders vorteilhaft ist die Anwendung der Varianten in einer Anordnung zur Abbildung des von einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles in einem Elektronen- bzw. auch einem Ionenmikroskop oder in Optiken der Projektionslithographie.

[0021] Im Folgenden wird die Erfindung anhand der Zeichnungen beispielhaft näher erläutert.

[0022] Fig. 1 zeigt eine schematische Darstellung des Korrektors;

[0023] Fig. 2a-c zeigen den Geschwindigkeitsinverter mit dem transmittierten Teilchenensemble zu drei verschiedenen Zeiten;

[0024] Fig. 3 zeigt eine schematische Darstellung der Energie-Ortsverteilung der Teilchen innerhalb der Rundlinsenoptik bzw. eines Mikroskopes;

[0025] Fig. 4a + b zeigen eine Anordnung zur Korrektur der sphärischen Aberration;

[0026] Fig. 5 zeigt eine Anordnung gemäß Fig. 4b mit einer Korrekturlinse, um den Öffnungsfehler der Rundlinse zu kompensieren.

[0027] Eine bevorzugte Ausführungsart des erfindungsgemässen chromatischen Korrektors nutzt aus, dass sich mittels einer geeigneten Elektrodenanordnung und einer schnell schaltbaren Spannung eine Inversion der Elektronen-Geschwindigkeitsverteilung realisieren lässt. Fig. 1 zeigt den schematischen Aufbau dieser Ausführungsart. Die Elektronen mit der Sollenergie  $E_0$  werden von dem Linsensystem so abgelenkt, dass der Fokus in der korrekten Bildebene liegt. Dagegen werden die Elektronen mit der Energie  $E_0 + \Delta E$  von den Elektronenlinsen zu schwach abgelenkt, so dass ihr Fokus, d. h. die Bildebene, zu höheren z-Werten verschoben ist. Der zugehörige chromatische Fehlerkoeffizient  $c_c$  ist folglich immer positiv. Im Gegensatz zur Lichtoptik lässt sich aus diesem Grunde kein achromatisches elektronenoptisches Linsensystem aus Rundlinsen bauen.

[0028] In Fig. 1 ist der Inverter, bestehend aus den Elek-

troden 4, 5 und 6, zwischen Linse 2, Driftrohr 3 und Linse 7 eingesetzt. Das Prinzip des Inverters nutzt aus, dass ein Elektronenbündel mit einer Energiebreite  $\Delta E$  in einem niederenergetischen Driftbereich 3 in Folge der verschiedenen Geschwindigkeiten auseinanderfließt (Dispersion). Nach Durchlaufen des Driftbereiches haben die Elektronen eine räumliche Verteilung, wie in Fig. 2a dargestellt ist. Die schnellsten Elektronen 10 mit Energie  $E_0$  begrenzen das Bündel in Flugrichtung, die mittlere Energie  $E_0 - \Delta E/2$  entspricht den Elektronen 11 und die langsamsten Elektronen 12 mit Energie  $E_0 - \Delta E$  definieren das Ende des Bündels. In dieser durch die Dispersion entstandenen räumlichen Konfiguration treten die Elektronen durch die Bohrung in der Eintrittselektrode 4 in den erfindungsgemässen Inverter ein. Zum Schaltzeitpunkt  $t = t_s$  liegt das Elektronenbündel vollständig im Inverter, wie in Fig. 2b gezeigt ist. In diesem Moment wird die Spannung  $U(t)$  an der Eintrittselektrode 4 schnell um den Betrag  $\Delta U$  verringert, bzw. zu negativen Werten verschoben. Dadurch baut sich das elektrische Feld  $F$  auf. Seine Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit kann im Vergleich mit den hier relevanten Zeiten vernachlässigt werden. Eine genauere Betrachtung ergibt, dass eine axiale Änderung eines elektrischen Feldes mit einem ringförmigen magnetischen Feld einhergeht. Dieses bewirkt aber im Gegensatz zu magnetostatischen Linsen keine energieabhängige Bilddrehung, was zum Vorteil des Korrektors auch bei extrem hochfrequentem Einsatz ist.

[0029] Rechnungen zeigen, dass bei schnell geschalteten elektrostatischen Linsen eine zusätzliche Linsenwirkung auf Grund des induzierten magnetischen Ringfeldes entsteht. Diese Linsenwirkung ist allerdings bei typischen Schaltzeiten und Geometrien gegenüber der elektrostatischen Linseneinwirkung zu vernachlässigen.

[0030] Die schnellsten Elektronen 10, die im hier gezeigten Beispiel das Zentrum der Austrittselektrode 6 erreicht hatten, werden durch das elektrische Feld nicht mehr beeinflusst. Dagegen werden die langsameren Elektronen 11 und 12 beim Durchlaufen der restlichen Strecke des Inverters nachbeschleunigt, wobei ihr Energiegewinn proportional zum Abstand des betrachteten Elektrons von der Austrittselektrode 6 ist. Für das gezeigte Beispiel sei  $\Delta U = 2\Delta E/e$ . In diesem Fall werden die langsameren Elektronen 12, die zum Zeitpunkt  $t = t_s$  die Ebene der Eintrittselektrode 4 erreicht hatten, um den Energiebetrag  $2\Delta E$  beschleunigt, da sie das volle beschleunigte Feld durchlaufen müssen. Entsprechend werden die mittleren Elektronen 11 um den Energiebetrag  $\Delta E$  beschleunigt, da sie nur die halbe Länge des Beschleunigungsfeldes durchlaufen müssen. Nach Austritt aus dem Inverter, Fig. 2c, ist die Energieverteilung folglich invertiert. Die Elektronen am Beginn des Bündels 10 haben die unveränderte Energie  $E_0$ , die Elektronen in der Mitte des Bündels 11 haben jedoch die neue Energie  $E_0 + \Delta E/2$  und die Elektronen am Ende des Bündels 12 die neue Energie  $E_0 + \Delta E$ .

[0031] Durch die Variation des Spannungshubes  $\Delta U$  lässt sich erreichen, dass die neue Energieverteilung hinter der Beschleunigungsstrecke nicht symmetrisch zur Energie  $E_0$  invertiert wurde, d. h. die neue Energie der Elektronen 11 beträgt dann  $E_0 + x\Delta E/2$  und die neue Energie der Elektronen 12 beträgt  $E_0 + x\Delta E$ . Dieser Fall kann für die gewählte Konfiguration vorteilhaft sein. Ebenso ist das gezeigte Beispiel, in dem das Elektronenbündel zur Zeit  $t = t_s$  den gesamten Inverter ausfüllt (Fig. 2b) keine zwingende Forderung des Verfahrens. Das Prinzip ist jedoch immer, dass die anfangs langsamsten Elektronen 18 nach Durchlaufen des Inverters zu den schnellsten Elektronen geworden sind. Die Elektrodenanordnung 5 dient zur Randfeldkorrektur. In der für elektrostatische Beschleuniger gebräuchlichen Weise definieren diese Elektroden einen gleichmäßigen Spannungs-

abfall, indem sie z. B. durch eine Widerstandskette untereinander und an den Enden der Beschleunigungsstrecke mit den Elektroden 4 und 6 verbunden sind. Das beschleunigte Feld kann in einfachster Ausführung homogen sein. Es kann aber auch durch geeignet geformte Elektroden und durch die Wahl des Spannungsanstiegs von dieser einfachen Bauform abweichen, um dadurch bessere elektronenoptische Eigenschaften zu erzielen. Für die prinzipielle Funktionsweise des Inverters der Energieverteilung ist die genaue Form des Feldes nicht von Bedeutung.

[0032] Fig. 1 zeigt den Einsatz des erfindungsgemässen chromatischen Korrektors in einem elektronenoptischen System aus zwei Sammellinsen 2 und 7. Im gezeigten Ausführungsbeispiel wird das vom Gegenstandspunkt 1 ausgehende Teilchenensemble durch die erste Linse 2 annähernd in einen Parallelstrahl umgewandelt, welcher in der Driftstrecke 3 infolge der Energiebreite  $\Delta E$  räumlich auseinanderläuft, dann den aus Eintrittselektrode 4, Korrektorelektrode 5 und Austrittselektrode 6 bestehenden Inverter durchläuft, welcher zum Zeitpunkt  $t = t_s$  geschaltet wird und zuletzt durch die zweite Linse 7 in den Bildpunkt 8 fokussiert wird. Infolge der chromatischen Aberration der ersten Linse 2 werden die niederenergetischen Elektronen (gestrichelte Bahnen) stärker gebrochen als die hochenergetischen Elektronen (durchgezogene Bahnen). Durch die oben beschriebene Inversion der Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen beim Durchlaufen des Inverters werden die anfänglich niederenergetischen Elektronen zu den hochenergetischen Elektronen, angedeutet durch Vertauschung der durchgezogenen und gestrichelten Bahnen. Die zweite Linse 7 wirkt auf Grund der chromatischen Aberration wieder auf die niederenergetischen Elektronen stärker brechend, so dass nun der chromatische Fehler der ersten Linse 2 aufgehoben wird. Alle Strahlen vereinigen sich idealerweise im Bildpunkt 8. Bei ausgeschaltetem Korrektor bleiben dagegen die innen verlaufenden Bahnen den niederenergetischen Elektronen zugeordnet und die zweite Linse 7 wirkt auf diese Elektronen nochmals stärker brechend, es resultieren die gepunkteten Bahnen. In der Summe der Linse 2 und Linse 7 ergibt sich nun ein deutlicher chromatischer Fehler ohne Korrektor 8 und 9 und bei eingeschaltetem Korrektor (nur 8).

[0033] Fig. 3 erläutert diese Ausführungsform des Korrektors anhand eines schematischen Diagramms zur Energie-Ortsverteilung. Das von der Probe 13 emittierte Teilchenensemble wird von der Rundlinsenoptik 14 transportiert, in der Verzögerungsstrecke 15 retardiert und läuft in der Driftstrecke 16 räumlich auseinander, so dass das Ensemble 21 im schaltbaren Teil 17 der Driftstrecke 16 (= Geschwindigkeitsinverter) entlang der z-Achse auseinandergezogen ist.

[0034] Das Schalten der Beschleunigungsstrecke 17 hebt den niederenergetischen Teil des Teilchenensembles so an, dass eine Inversion der Geschwindigkeitsverteilung resultiert (siehe Verteilung 22). Der nachfolgende Teil der Abbildungsoptik 18 nutzt diese Inversion zur Korrektur der chromatischen Aberration aus, so dass sich auf dem Detektor 19 ein scharfes Bild ergibt.

[0035] Der erfindungsgemässe Korrektur der sphärischen Aberration nutzt aus, dass sich mittels einer schnell schaltbaren Linsenspannung eine elektronenoptische Zerstreuungslinse mit negativem  $c_s$  realisieren lässt. Das Prinzip ist in Fig. 4 erläutert. Die Linsenelemente 23 und 24 bilden eine einfache Linse. Im statischen Betrieb arbeitet die Linse bei der Abbildung des Gegenstandspunktes 25 in allen Betriebsarten, d. h. sowohl mit beschleunigendem, als auch mit abbremsendem Feld immer als Sammellinse. In Fig. 4a ist dieses wohlbekannte Verhalten für den abbremsenden Fall dargestellt. Beim Übergang vom Rohrelement 23 zum Rohrelement 24 werden die Elektronen retardiert. Die in radialer

Richtung wirkende Kraft  $F_r$  ist im unteren Teil von Fig. 4a als Funktion des Weges entlang der optischen Achse  $z$  dargestellt. Die Kraft wirkt bei Annäherung eines Elektrons an die Ebene 26 zunächst in positiver Richtung, d. h. von der optischen Achse weg. In der Ebene 26, die mittig zwischen den Rohrenden der Elemente 23 und 24 verläuft, kehrt die Kraft ihr Vorzeichen um und wirkt nun zur Achse hin. Da die Elektronen in diesem Bereich der negativen Kraftwirkung bereits verlangsamt sind, ist ihre Aufenthaltsdauer im Bereich des negativen Kraftfeldes größer als im Bereich des positiven Kraftfeldes. Daraus resultiert insgesamt eine Ablenkung zur Achse hin, d. h. eine konvergierende Wirkung. [0036] Bei der Abbildung des Gegenstandspunktes 25 werden die außenliegenden Strahlen stärker gebrochen als die innenliegenden Strahlen. Dies äußert sich in einer entsprechenden Abweichung zwischen den zugehörigen Bildpunkten 27 und 28. Diese statische Betriebsart ist durch einen positiven Öffnungsfehlerkoeffizient  $c_s$  gekennzeichnet, da die Bahnen mit wachsendem Startwinkel  $\alpha$  immer stärker gebrochen werden. Das Resultat ist eine Verschiebung des Bildpunktes der Randstrahlen im Vergleich zum idealen (paraxialen) Bildpunkt 27 in negative  $z$ -Richtung, siehe Bildpunkt 28. Die Linsenwirkung auf die Randstrahlen ist zu stark, analog zu einer lichtoptischen sphärischen Sammellinse. Der Übersichtlichkeit halber sind in den Figuren die Radien der Bahnen in der üblichen Weise überhöht dargestellt. Die Abweichung in der Lage der Bildpunkte von der idealen Bildebene infolge der sphärischen Aberration ist proportional zum Fehlerkoeffizient  $c_s$  der Linse und der dritten Potenz des Startwinkels, d. h.  $\Delta z$  proportional  $c_s \alpha^3$ . [0037] In Fig. 4b ist der erfindungsgemäße Betrieb der Linse als Korrektor dargestellt. Mittels eines ultraschnellen Spannungspulsers wird die Spannung am Element 23 zum Zeitpunkt  $t = t_s$  (Schaltzeitpunkt) sehr schnell um einen negativen Betrag  $-\Delta U$  verändert. Zu diesem Zeitpunkt  $t_s$  hat das Elektronenbündel genau die Ebene 26 erreicht, in der die Kraftwirkung ihr Vorzeichen wechselt. Während die Elektronen also bis zum Schaltzeitpunkt  $t_s$  die gleiche divergierende Wirkung erfahren, wie im statischen Fall von Fig. 4a, erfahren sie für  $t > t_s$ , d. h. beim Übergang in das rechte Element 24 eine veränderte Kraftwirkung. Je nach Größe von  $\Delta U$  kann die Kraft gleich Null, divergierend oder auch schwächer konvergierend sein. Der in Fig. 4b gezeigte Fall von  $F = 0$  liegt vor, wenn  $\Delta U$  genau der Retardierungsspannung zwischen den Elementen 23 und 24 vor dem Schaltzeitpunkt entspricht. Dies bedeutet, dass bei  $t = t_s$  die Linsenwirkung ausgeschaltet wird. Wenn  $\Delta U$  größer ist als die Retardierungsspannung, liegt divergierende Wirkung vor und wenn  $\Delta U$  kleiner ist, als die Retardierungsspannung, liegt eine abgeschwächte konvergierende Wirkung vor. In allen drei Fällen lässt sich erreichen, dass die Gesamtwirkung divergierend ist. Diese im korrekten Zeitpunkt geschaltete Linse weitet die Strahlen in der Art einer Zerstreuungslinse auf.

[0038] Wie jede Zerstreuungslinse erzeugt auch die erfindungsgemäße Anordnung in Fig. 4b ein virtuelles Bild, im Idealfall der achsennahen Strahlen im Punkt 29. Die Linsenwirkung auf die Randstrahlen ist auch hier zu stark, jedoch ist nun der Achsenschnittpunkt der rückwärtig verlängerten auslaufenden Strahlen, d. h. der virtuelle Bildpunkt der Randstrahlen 30 zu positiven  $z$ -Werten verschoben, im Vergleich mit dem Bildpunkt 29 der paraxialen Strahlen. Dies entspricht einem negativen Öffnungsfehlerkoeffizienten  $c_s$ . Bei geeigneter Wahl der Linsenparameter lässt sich mittels einer Korrektorlinse, wie in Fig. 4b gezeigt, der Öffnungsfehler einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik kompensieren.

[0039] Obwohl das Funktionsprinzip des Korrektors an

dem Fall der einfachen Zweielement-Rohrlinse in Fig. 4b vollständig beschrieben werden kann, kann für die praktische Ausführung, z. B. eine Dreielement-Linse, vorteilhaft sein. Zum einen braucht nur die Spannung an dem kurzen Mittelelement geschaltet zu werden, was für kurze Schaltzeiten aus Gründen der Kapazität günstig ist. Zum anderen können die Elektronen in dieser Ausführungsart des Korrektors nur auf dem relativ kurzen Weg durch das Mittelelement durch mögliche Brummspannung oder sonstige Störungen auf der Schaltspannung  $U(t)$  beeinflusst werden. Als eine einfache Betriebsart können die Randelemente auf fester Spannung  $U_L$  gehalten werden und das Mittelelement liegt anfangs auf  $U_L - \Delta U$  und springt im Schaltzeitpunkt  $t = t_s$  auf die Spannung  $U_L$ .

[0040] Für die bisher diskutierten Fälle wirkt die Korrektorlinse retardierend, d. h. die Elektronenenergie hat sich nach Durchlaufen der Linse verringert, obwohl die Randelemente beide auf gleichem Potential  $U_L$  liegen. Die Korrektorlinse kann auch beschleunigend betrieben werden, der Spannungssprung zur Zeit  $t_s$  erfolgt dabei in umgekehrter Richtung. Im Fall der Zweielement-Linse, Fig. 4b, liegen zunächst beide Elemente 23 und 24 auf gleichem Potential und zum Schaltzeitpunkt springt das Element 23 um den Wert  $-\Delta U$  auf negativeres Potential. Daraus resultiert eine Beschleunigung und eine divergierende Kraftwirkung. Im Fall der Dreielement-Linse liegen zunächst alle drei Elemente auf  $U_L$ . Der Schaltzeitpunkt ist jetzt dadurch definiert, dass das Elektronenbündel die Ebene am Ende des Mittelelements erreicht. Zu diesem Zeitpunkt springt das Mittelelement um den Wert  $-\Delta U$  auf negativeres Potential. Daraus resultiert ebenfalls eine Beschleunigung und eine divergierende Kraftwirkung.

[0041] Als eine mögliche Ausführungsart ist in Fig. 5 schematisch dargestellt, wie sich der Öffnungsfehler einer Rundlinse durch die patentgemäße Korrektorlinse nach Fig. 4b kompensieren lässt. Der Korrektor wirkt auf das konvergente Strahlenbündel hinter der Sammellinse aus Elementen 23 und 24 und macht den Öffnungsfehler dieser Linse wieder rückgängig, so dass sich alle Strahlen im Bildpunkt 32 schneiden. Das zum Zeitpunkt  $t_s$  geschaltete Korrektorelement 24 wirkt dabei zerstreuernd auf das zum Zeitpunkt  $t_s$  in der Ebene 26 befindliche Teilchenensemble, wie in Fig. 4b beschrieben.

[0042] Ohne Korrektor zeigen die Bildpunkte 27 und 28 eine deutliche sphärische Aberration (gestrichelte Teilchenbahnen). In allen Fällen muss die Stabilität der geschalteten Spannung genügend hoch und die Brummamplitude genügend klein sein, um zusätzliche Aberrationen zu vermeiden.

#### Bezugszeichenliste

- 1 Gegenstandspunkt
- 2 erste Linse
- 3 Driftstrecke
- 4 Eintrittselektrode des Geschwindigkeitsinverters
- 5 Korrektorelektroden des Geschwindigkeitsinverters
- 6 Austrittselektrode des Geschwindigkeitsinverters
- 7 zweite Linse
- 8 Bildpunkt aller Elektronen bei eingeschaltetem Korrektor
- 9 Bildpunkt der langsamen Elektronen bei ausgeschaltetem Korrektor
- 10 Elektronen mit der maximalen Geschwindigkeit vor Eintritt in den Korrektor
- 11 Elektronen mit der mittleren Geschwindigkeit vor Eintritt in den Korrektor
- 12 Elektronen mit der geringsten Geschwindigkeit vor Eintritt in den Korrektor
- 13 Position der Probe

14 Mikroskopoptik	
15 Verzögerung der Elektronen	
16 niederenergetische Driftstrecke	
17 schnell schaltbarer Teil der Driftstrecke (Geschwindigkeitsinverter)	5
18 Abbildungsoptik	
19 Position des Detektors	
20 Energie-Ortsverteilung der Elektronen an der Probe	
21 Energie-Ortsverteilung der Elektronen in der Driftstrecke ohne Inversion	10
22 Energie-Ortsverteilung der Elektronen in der Driftstrecke mit Inversion	
23 erstes Linsenelement	
24 zweites Linsenelement	
25 Gegenstandspunkt	15
26 Ebene des Schaltzeitpunktes	
27 paraxialer Bildpunkt	
28 Bildpunkt der Randstrahlen	
29 paraxialer virtueller Bildpunkt	
30 virtueller Bildpunkt der Randstrahlen	20
31 drittes Linsenelement	
32 Bildpunkt aller Strahlen bei eingeschaltetem Korrektor	
$U_L, U_L'$ feste Linsenspannungen	
$U(t)$ geschaltete Linsenspannungen	
$\alpha$ Öffnungswinkel	25

#### Patentansprüche

1. Anordnung zur Abbildung des von mindestens einem von mehreren Punkten einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einem Detektor, umfassend ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei ein Teil der Rundlinsenoptik durch mindestens eine schnell schaltbare Spannung derart ansteuerbar ist, dass die Geschwindigkeit der einzelnen Teilchen des Teilchenensembles derart beeinflusst wird, dass die von einem Punkt ausgehenden Teilchen in nahezu einem Punkt die Bildebene durchstoßen und so der chromatische Fehler der Abbildung reduziert wird. 30
2. Anordnung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Spannung innerhalb eines Zeitraumes zu schalten ist, innerhalb dessen sich das Teilchenensemble im Bereich der Rundlinsenoptik befindet. 35
3. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass in einer niederenergetischen Driftstrecke innerhalb der Rundlinsenoptik sich der Abstand zwischen den Teilchen unterschiedlicher Energien im Ensemble zueinander erhöht. 40
4. Anordnung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Teilchen innerhalb des Teilchenensembles vor Eintritt in die Driftstrecke durch eine Gegenspannung abgebremst werden. 45
5. Anordnung nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Geschwindigkeitsverteilung des Teilchenensembles durch eine schnell schaltbare Spannung invertiert wird. 50
6. Anordnung nach Anspruch 5, dadurch gekennzeichnet, dass zur Korrektur der chromatischen Aberration der der Driftstrecke nachgeschaltete Teil der Rundlinsenoptik einen auf die Inversion abgestimmten chromatischen Fehler aufweist, so dass die Brennweite für alle Teilchenenergien eines Teilchenensembles nahezu gleich ist. 55
7. Anordnung zur Abbildung des von mindestens einem von mehreren Punkten einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einem Detektor, umfassend ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei ein Teil der Rundlinsenoptik durch mindestens eine schnell schaltbare Spannung derart ansteuerbar ist, dass die Bahn der einzelnen Teilchen des Teilchenensembles so beeinflusst wird, dass die von einem Punkt ausgehenden Teilchen in nahezu einem Punkt die Bildebene durchstoßen und so der sphärische Fehler der Abbildung reduziert wird, wobei zu diesem Zweck eine Linse der Optik sehr schnell geschaltet wird, während das Teilchenensemble sich im Linsenfeld befindet und die sphärische Aberration dieser Linse die der übrigen Teilchenoptik kompensiert. 60
12. Anordnung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Schaltzeitpunkt so gewählt ist, dass die schnell schaltbare Linse als Zerstreuungslinse wirkt. 65
13. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor einen Leuchtschirm umfasst.
14. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor ein Zeitfenster aus dem zur Abbildung gelangenden Teilchenensemble selektiert, um die Pulslänge so einzuschränken, dass die Fehler korrigierbar sind.
15. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor den Ort und die Zeit des Auftreffens der Teilchen einzeln erfasst.
16. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor eine CCD-Kamera ist.
17. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Teilchen Elektronen oder Ionen sind.
18. Gerät nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Anordnung Teil eines Elektronenmikroskops, eines Ionenmikroskops oder eines Geräts für die Projektionslitho-

send ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei die Rundlinsenoptik eine niederenergetische Driftstrecke aufweist, um den Abstand der Teilchen mit verschiedenen Energien im Teilchenensemble zueinander zu vergrößern, wobei bei Passieren der nach der Driftstrecke angeordneten Rundlinsenoptik durch die Teilchen, die Brennweite der Rundlinsenoptik zu jedem Zeitpunkt so angepasst wird, dass sich für alle Teilchenenergien eine scharfe Abbildung ergibt.

8. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Rundlinsenoptik derart angesteuert wird, dass alle Teilchenenergien des Ensembles mit identischem Vergrößerungsmaßstab auf dem Bildschirm abgebildet werden.

9. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche dadurch gekennzeichnet, dass die Abbildungen verschiedener Teilchenenergien getrennt aufgezeichnet und mittels numerischer Verfahren maßstäblich einander angepasst werden und zur Deckung gebracht werden.

10. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Rundlinsenoptik zumindest eine teilchenoptische Rundlinse umfasst.

11. Anordnung zur Abbildung des von mindestens einem von mehreren Punkten einer Probe gepulst emittierten Teilchenensembles auf einem Detektor, umfassend ein Abbildungssystem mit einer teilchenoptischen Rundlinsenoptik, wobei ein Teil der Rundlinsenoptik durch mindestens eine schnell schaltbare Spannung der Art ansteuerbar ist, dass die Bahn der einzelnen Teilchen des Teilchenensembles so beeinflusst wird, dass die von einem Punkt ausgehenden Teilchen in nahezu einem Punkt die Bildebene durchstoßen und so der sphärische Fehler der Abbildung reduziert wird, wobei zu diesem Zweck eine Linse der Optik sehr schnell geschaltet wird, während das Teilchenensemble sich im Linsenfeld befindet und die sphärische Aberration dieser Linse die der übrigen Teilchenoptik kompensiert.

12. Anordnung nach Anspruch 11, dadurch gekennzeichnet, dass der Schaltzeitpunkt so gewählt ist, dass die schnell schaltbare Linse als Zerstreuungslinse wirkt.

13. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor einen Leuchtschirm umfasst.

14. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor ein Zeitfenster aus dem zur Abbildung gelangenden Teilchenensemble selektiert, um die Pulslänge so einzuschränken, dass die Fehler korrigierbar sind.

15. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor den Ort und die Zeit des Auftreffens der Teilchen einzeln erfasst.

16. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass der Detektor eine CCD-Kamera ist.

17. Anordnung nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Teilchen Elektronen oder Ionen sind.

18. Gerät nach einem oder mehrerer der voranstehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass die Anordnung Teil eines Elektronenmikroskops, eines Ionenmikroskops oder eines Geräts für die Projektionslitho-

graphie ist.

Hierzu 5 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

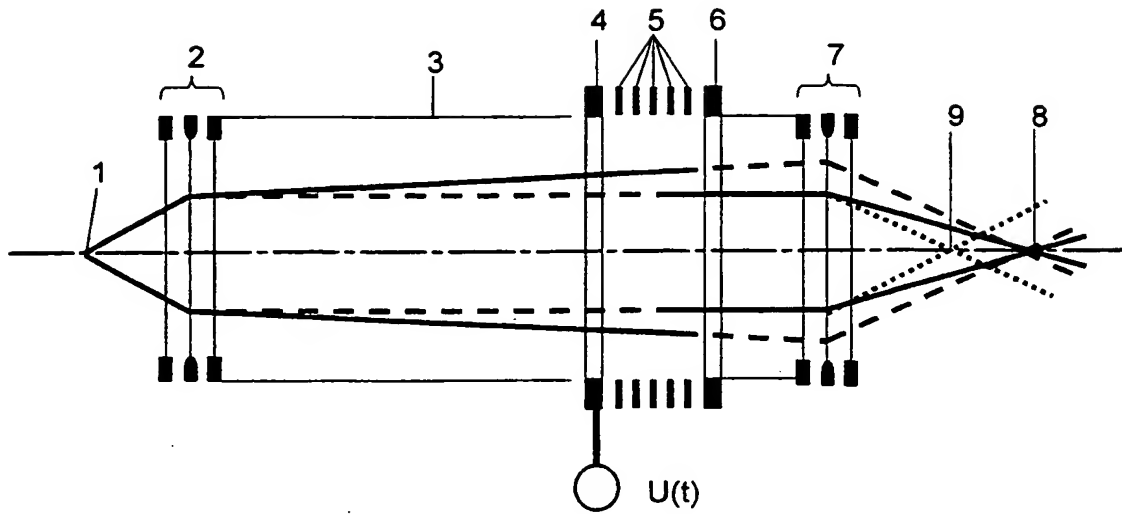


Fig. 1



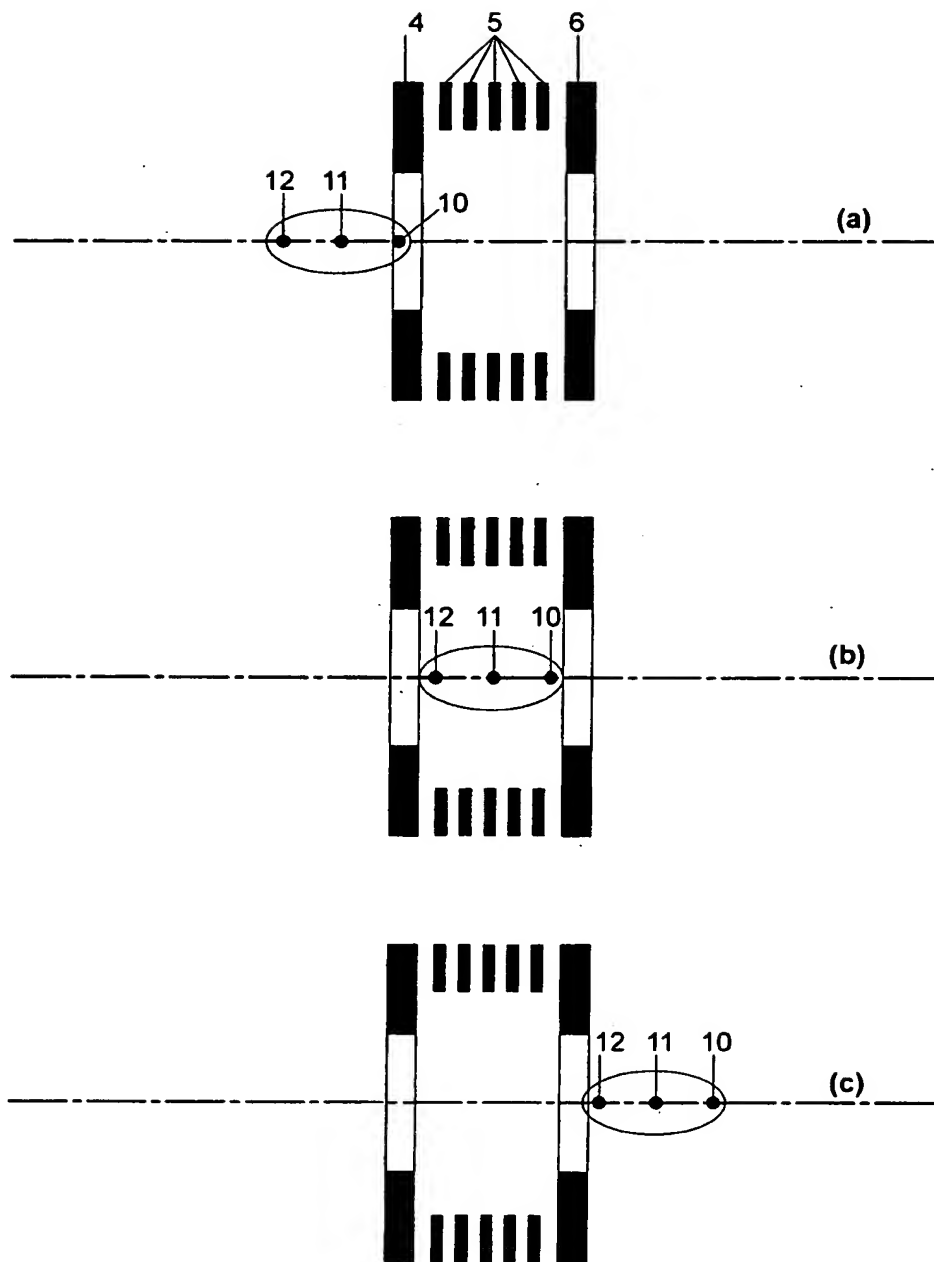
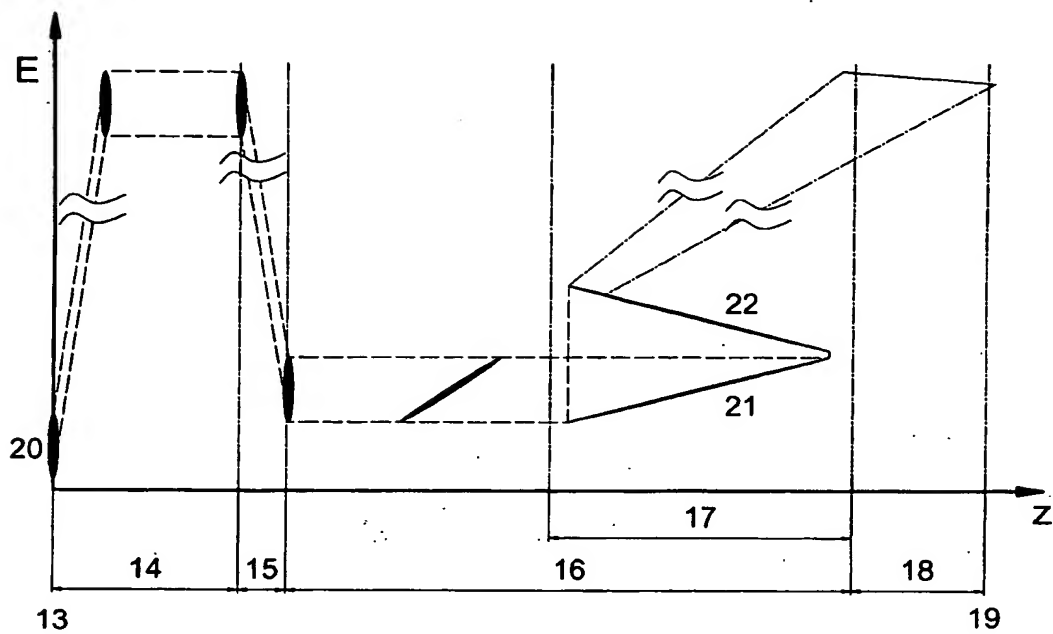


Fig. 2



**Fig. 3**

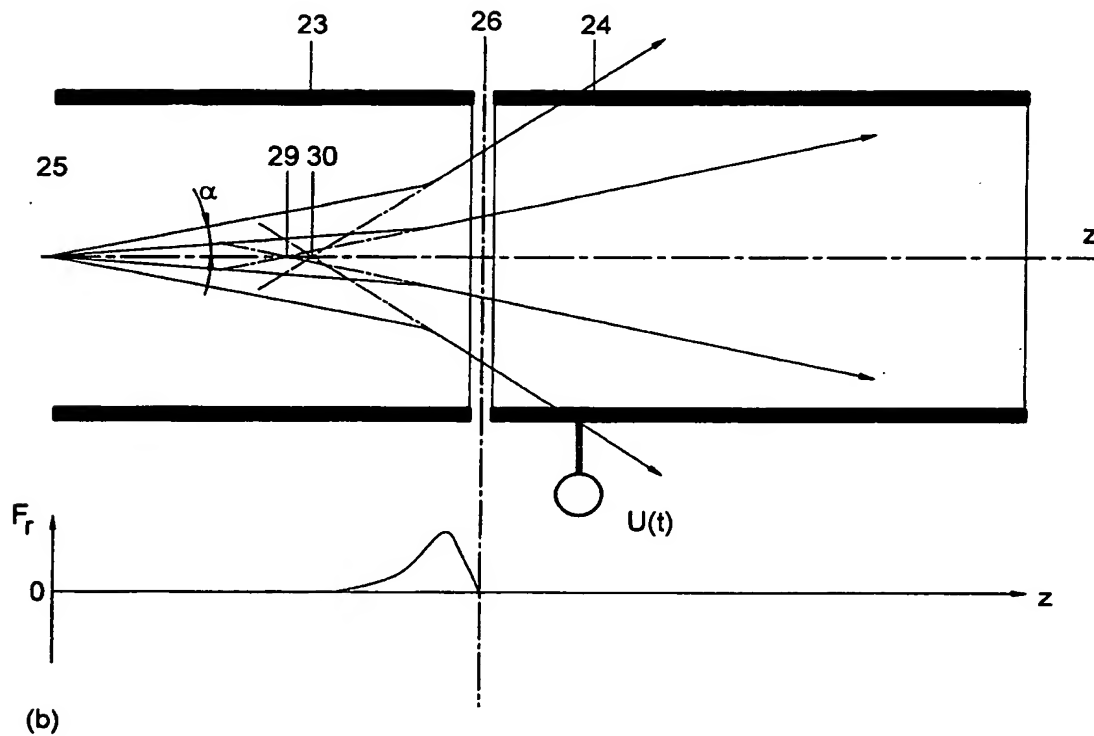
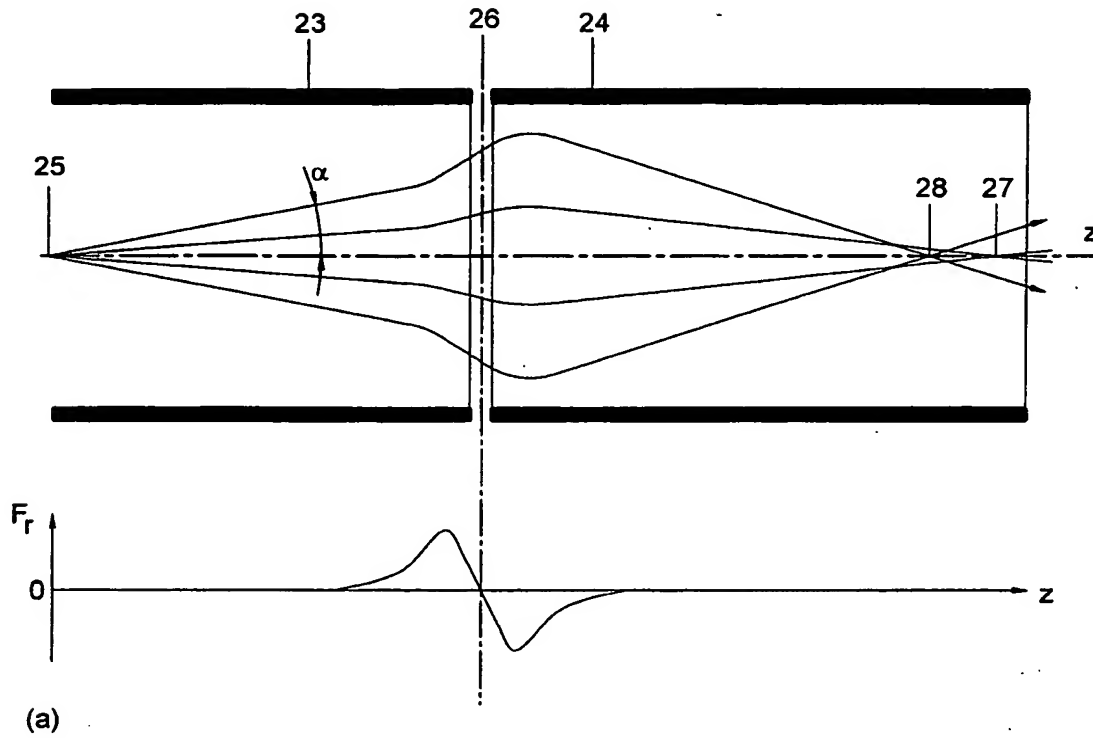


Fig. 4

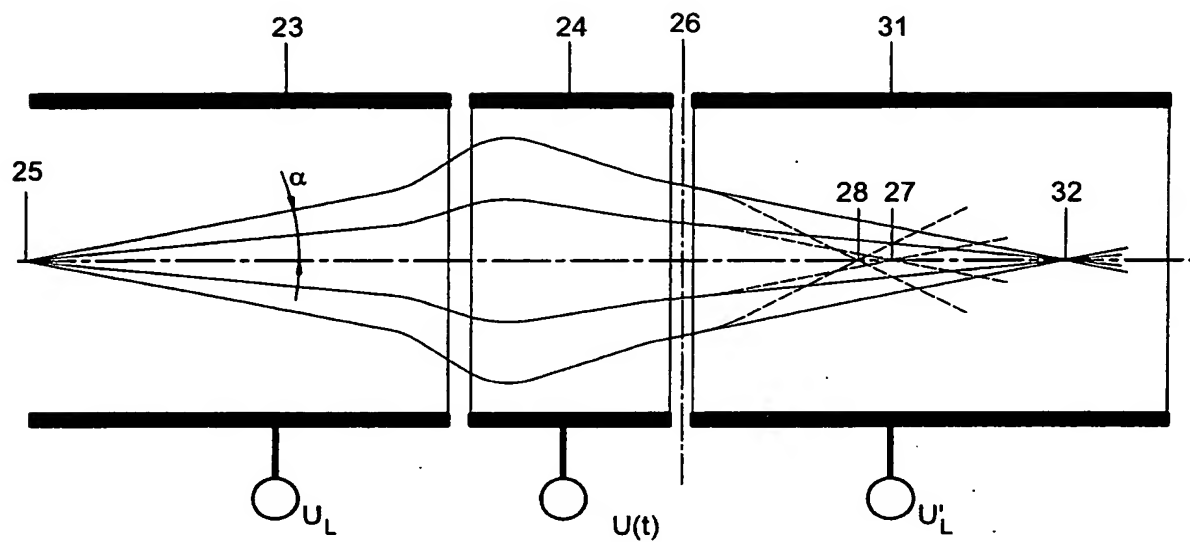


Fig. 5